

ESTUDO DO DESEMPENHO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM FIBRAS DE CARBONO QUANDO EXPOSTAS A ALTAS TEMPERATURAS

Eloisa Pedroso (1), Daiane Dos Santos Da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) eloisapedroso1@gmail.com, (2) dss@unesc.net

RESUMO

Quando exposto ao fogo numa ação contínua por tempo determinado, o concreto está passível a manifestações patológicas. Uma das técnicas que pode ser utilizada para reforçar uma estrutura sujeita a estas altas temperaturas em um incêndio é a fibra de carbono, método empregado com frequência atualmente. Porém, é necessário considerar que uma estrutura reforçada pode sofrer um novo incêndio. Diante o exposto, este trabalho tem por intuito analisar vigas reforçadas com fibra de carbono e aquecidas, simulando um novo sinistro. Para tanto, foram confeccionadas doze vigas com mesmas dimensões e armaduras. Destas seis foram reforçadas com fibra de carbono e seis não reforçadas, como comparação. Estas doze vigas foram levadas às temperaturas de 400 °C e 800 °C, simulando incêndios de grau médio. Para a temperatura ambiente fez-se uso dos resultados obtidos por Kny, em seu trabalho, visto que as vigas possuíam mesmo traço, dimensões e armadura. Após o aquecimento as vigas foram submetidas à ruptura pelo ensaio de flexão à 3 pontos na região de maior tração. Como resultado, pode-se avaliar que de acordo com o deslocamento máximo ($L/250$) de 3,4 mm e a carga máxima de ruptura, as amostras em temperatura ambiente (23 °C), tiveram um acréscimo significativo em suas resistências, já as vigas aquecidas a 400 °C e 800 °C reforçadas não obtiveram resultados significativos devido em grande parte a volatilização da resina epóxi, responsável pela fixação concreto/fibra.

Palavras-Chave: Concreto; Altas temperaturas; Fibra de carbono.

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é um dos materiais mais empregados na construção civil brasileira. Tanto suas propriedades físicas quanto mecânicas fazem deste, uma opção cabível quando se refere a uma estrutura que necessita de resistência e durabilidade. Segundo Albuquerque (2012), estas estruturas também são conhecidas por seu bom desempenho quando expostas a altas temperaturas. Este tipo de material possui algumas vantagens como a não combustão e a baixa condutividade térmica, além

disso os elementos de concreto são robustos e por este motivo retardam a propagação do calor para o interior do elemento estrutural.

Quando exposto ao fogo numa ação duradoura, o concreto está passível a manifestação de problemas como redução de resistência e rigidez, fatos que ocorrem devido aos danos causados as propriedades dos materiais que o integram (SILVA, 2009). Segundo Costa, Figueiredo, Silva (2002, Apud ALMEIDA, AINON, FILHO, 2013): “a deterioração do concreto, ao ser aquecido, manifesta-se na forma de rachaduras, estalos (pipocamentos) e até lascamentos. Esses últimos, podem ser explosivos ou não.” O concreto sofre também, mudanças sucessivas em sua coloração devido à alteração em suas propriedades mecânicas. Sendo necessária a avaliação desta nova coloração pós-incêndio, para verificar possíveis mudanças de resistência e módulo de elasticidade do material (SILVA, 2009). Após um incêndio é necessário verificar as condições da estrutura, para uma possível recuperação ou reforço. Uma das técnicas que pode ser utilizada para o reforço é a fibra de carbono.

Segundo Schneider et al. (2017), a partir dos anos 1980 iniciaram-se diversos estudos relacionados a eficiência de reforços com fibras de carbono em estruturas. Apesar de seu custo um tanto elevado, a fibra de carbono vem ganhando cada vez mais espaço, principalmente devido a suas ótimas propriedades, como alta rigidez, baixa corrosão e facilidade na aplicação do reforço.

Como relatado, em estruturas incendiadas é comum o reforço com fibras de carbono para devolver à mesma, a capacidade portante reduzida devido ao aquecimento. Tem-se como exemplo na região de Criciúma, o reforço do prédio da prefeitura (Paço Municipal) onde ocorreram 2 incêndios seguidos e a mesma foi reforçada com fibras de carbono.

Em 2017, Kny pesquisou e avaliou a eficiência do reforço de fibras para recuperar vigas sinistradas, nas temperaturas de 400°C e 800°C, avaliando ainda vigas reforçadas em temperatura ambiente, 23°C. Kny constatou ao final de sua pesquisa, que as vigas sem reforço e as reforçadas em temperatura ambiente assim como as vigas aquecidas a 400°C e reforçadas recuperaram sua capacidade portante. Já as vigas aquecidas a 800°C e reforçadas não apresentaram um desempenho significativo na resistência com incremento da fibra de carbono, devido à falta de aderência

concreto/fibra.

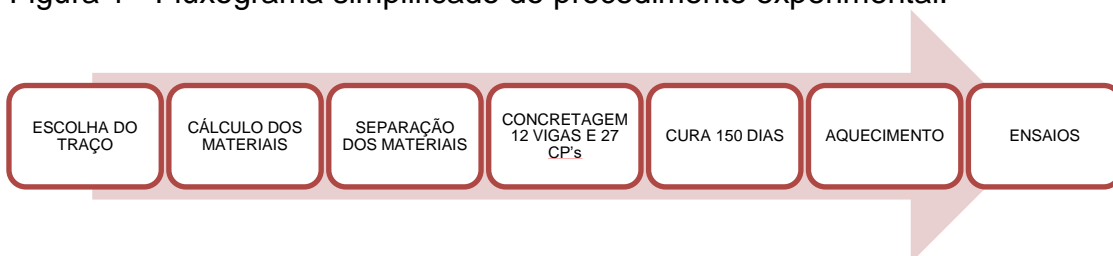
Diante o exposto, surge então um questionamento, sobre qual seria o comportamento da estrutura reforçada com fibra de carbono, se a mesma sofresse um novo incêndio. Com o intuito de verificar o comportamento de estruturas reforçadas com fibras de carbono e submetidas a altas temperaturas, no presente trabalho foram produzidas 12 vigas, todas com seção 12 x 25 cm e comprimento de 95 cm, com fck de 40 MPa. Estas foram divididas em dois grupos, vigas aquecidas a 400 °C e vigas aquecidas a 800 °C, os dois grupos foram subdivididos em vigas sem reforço e vigas reforçadas. O objetivo geral é a avaliação do comportamento no desempenho de vigas reforçadas com fibras de carbono e aquecidas. É necessário relatar que segundo Lima et al. (2002), em um incêndio as temperaturas podem atingir com facilidade 250 °C no tipo doméstico, 800 °C em sinistros de maiores proporções e até 1100 °C em grandes desastres. Com base nesta afirmação, para o presente estudo foi designado a máxima temperatura de 800 °C que simula um incêndio de proporções médias.

Este artigo dá continuidade aos estudos de Kny, porém verificando a eficiência do reforço simulando um novo incêndio. Para as vigas analisadas em temperatura ambiente, foram utilizados os resultados obtidos por Kny em seu artigo, visto que as dimensões, armadura e traço são os mesmos empregados por ele.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados durante a realização da pesquisa referente a este artigo, juntamente com o fluxograma esquemático do procedimento experimental adotado (Figura 1).

Figura 1 - Fluxograma simplificado do procedimento experimental.



Fonte: Da autora, 2017.

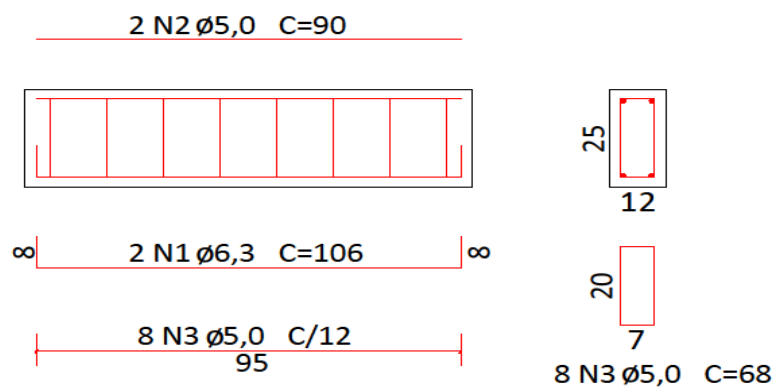
Foram necessárias 4 misturas na betoneira para concluir a concretagem das 12 vigas e dos 27 corpos de prova cilíndricos. Para o adensamento correto do concreto foi utilizado vibrador de imersão.

Tais vigas possuíam seção de 12 X 25 cm na seção transversal e 95 cm de seção longitudinal. Foram utilizadas 2 barras de \varnothing 6,3 mm na armadura de flexão e 2 barras de \varnothing 5,0 mm na armadura de cisalhamento. O detalhamento dos estribos foi baseado na norma NBR 6118:2014, adotando-se ângulos de inclinação de 90 graus e inclinação das bielas de 45 graus. Para todas as vigas analisadas o espaçamento dos estribos foi de 12 cm, sendo utilizadas 8 barras de estribos com \varnothing 5,0 mm. Este detalhamento teve como base os estudos de Kny (2017).

Os 27 corpos de prova cilíndricos, concretados junto as vigas possuíam seção de 10 cm X 20 cm de diâmetro e altura, respectivamente.

Na figura 2, se verifica o detalhamento de todas as vigas estudadas.

Figura 2 - Detalhamento de armaduras em todas as vigas.



Fonte: Da autora, 2017.

2.1 MATERIAIS

2.1.1 CONCRETO

O concreto produzido para as vigas foi dosado para atingir uma resistência característica de 40 MPa aos 28 dias de cura. O traço utilizado seguiu os estudos de Kny (2017), sendo este 1:2,85:3,15 com relação água cimento de 0,53 e teor de

argamassa de 55 %. O cimento utilizado na concretagem foi do tipo Portland tipo CPIV-32.

O agregado graúdo foi de origem granítica e sua granulometria foi de 19 mm, brita 1. O agregado miúdo empregado foi areia média natural. Ambos agregados foram cedidos e retirados das instalações do IPARQUE e passaram por um processo de secagem em estufa durante dois dias para retirada da umidade total, esta influenciaria o traço do concreto se não fosse retirada. Após este período foram pesados junto ao cimento e água para a concretagem.

Todas as quatro concretagens foram submetidas ao slump teste para verificação da consistência do concreto no estado fresco. Teve-se a verificação do abatimento do tronco de cone de 12 cm medidos com régua, em todas as misturas, por se tratar do mesmo traço.

2.1.2 FIBRA DE CARBONO

Para o reforço das vigas foi utilizado tiras de fibra de carbono com as seguintes características: gramatura de 300 g/m², resistência máxima a tração de 4900 Mpa e módulo de elasticidade de 230 GPa. Foram utilizadas 6 tiras bidirecionais de medidas 12 x 75 cm, sendo descontado a área de apoio das mesmas, ou seja 10 cm para cada lado, simulando assim a prática em obras. Estas foram dispostas na área tracionada das vigas de concreto armado chamadas de vigas reforçadas. A fibra foi fixada nas vigas com resina Epóxi.

2.1.3 RESINA EPÓXI

A resina utilizada na colagem da fibra ao concreto é responsável pela transferência de esforços de corte entre o concreto e a fibra de carbono. Esta, além de ser responsável pela junção dos dois elementos, cria uma película protetora entre a fibra e o ambiente, protegendo contra umidade, abrasão e oxidação.

Neste estudo, foi utilizada a Resina Epóxi Transparente, cujas características estão expostas na Tabela 1. Segundo o fabricante este tipo de resina tem alta resistência mecânica quando utilizada na fixação das fibras, elevada resistência química e baixa

contração.

A proporção resina/ endurecedor utilizada foi de 2:1, ou seja, 100 gramas de resina para 50 gramas de endurecedor, conforme indicado pelo fabricante. Posteriormente a mistura, o tempo de trabalho foi aproximadamente 18 minutos até o início do processo de polimerização. A cura do material ocorreu após 5 dias, quando teve-se início os ensaios.

Tabela 1 - Característica do compósito.

Características do Compósito (Fibra de carbono + resina epóxi)	
Resistência à tração	3800 MPa
Módulo de elasticidade	227 GPa
Espessura	0,33 mm

Fonte: MasterBrace®, 2016.

2.2 METODOLOGIA

A concretagem das vigas e corpos de prova se deu no Laboratório Experimental de Estruturas, em uma betoneira de 400 litros, feita em 4 etapas, sendo que em cada uma foram concretadas 3 vigas de concreto armado e 7 corpos de prova cilíndricos. Esta concretagem foi realizada seguindo a normatização NBR 14931 (2004).

O procedimento para concretagem das vigas e corpos de prova teve início com a passagem de desmoldante nas 12 vigas e 27 corpos de prova. Em seguida foram colocados todos os materiais dosados na betoneira e feito a mistura. Como continuidade da concretagem foi feito o slump teste, com média de 10 +/- 2 cm. As formas foram concretadas, adensadas com o vibrador de imersão, e posteriormente colocadas em local seco para que passassem pelo processo de cura de 28 dias. A desforma das vigas foi feita aos 150 dias, para em seguida fixar a fibra de carbono nas vigas, queima e consecutivos ensaios.

A aplicação da resina Epóxi nas vigas exigiu certo cuidado para que na superfície relacionada não possuísse poeira ou qualquer sólido que limitasse a eficiência da mesma. Após limpeza com escova e lixa, foi aplicada a resina e em seguida a fibra de carbono.

O dimensionamento do reforço calculado por Kny (2017), foi feito seguindo o método de Relvas descrito por ele em seu artigo, cuja referência foi feita segundo Machado (2006) no Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono. Quando aplicada a primeira demão de resina a fibra de carbono foi aplicada sobre a viga, em seguida fez-se a aplicação da segunda demão de resina Epóxi para unificar a fibra à viga de concreto armado, formando assim o sistema CFC. Após este processo as vigas foram depositadas no interior do Laboratório Experimental de Estruturas da UNESC – LEE, onde permaneceram por 5 dias aguardando a cura total da resina.

Dando continuidade, foram divididas as vigas em dois grupos, as vigas posteriormente aquecidas à temperatura de 400°C e as vigas que foram aquecidas à temperatura de 800°C.

Para o aquecimento das vigas fez-se necessário o uso da Mufla no laboratório localizado no IPARQUE.

No sentido de comparar a resistência das vigas aquecidas e as mantidas em temperatura ambiente (23°C), foi optado por utilizar os resultados já obtidos por Kny (2017) em seu artigo, tendo em vista que para seu estudo foram utilizadas vigas com mesmo traço, relação água cimento, armadura e tipo de resina.

Desta forma, para este estudo foram analisados os resultados dos ensaios de 18 vigas dispostas em 6 amostras diferentes, como exposto na tabela 2.

Tabela 2 - Divisões das amostras de vigas que compõem este estudo.

	23 °C	400 °C	800 °C
Vigas Sem Reforço (VSR)	3	3	3
Vigas Reforçadas (VR)	3	3	3

Fonte: Da autora, 2017.

Para o aquecimento, as vigas foram dispostas com área de tração, onde foram reforçadas, voltadas para cima, pois assim recebiam mais calor neste lado. O mesmo procedimento foi feito para os corpos de prova cilíndricos sem reforço com fibras de carbono. Sendo que 9 foram reservados para ensaios em temperatura

ambiente, e o restante foi dividido nos grupos de 400 °C e 800 °C e aquecidos junto as vigas de concreto armado.

Para cada temperatura estudada nesta pesquisa (400 °C e 800 °C), foi programado o aquecimento à uma taxa equivalente a 3 °C/min, em concordância indicada por RILEM TC129MHT (2000) apud KNY (2017), até a temperatura pretendida e nela conservada por 30 minutos, este tempo mínimo de 30 minutos, TRRF, é especificado pela norma NBR 14432 (2001). Após o aquecimento, a Mufla ficou fechada por 24 horas, para que as vigas e corpos de prova pudessem resfriar naturalmente. Posteriormente a este período, a Mufla foi aberta e teve-se início os ensaios.

Figura 3 - (A) Vigas e corpos de prova posicionados para aquecimento na Mufla; (B) Vigas após o aquecimento.



Fonte: Da autora, 2017.

2.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil - UNESC, aos 150 dias, mesma idade em que foram rompidas as vigas sem reforço e vigas reforçadas. Este ensaio seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 5739 (2007). A prensa usada foi a hidráulica Emic, modelo PC200 e para captação dos dados foi empregado o software Tesc 3.04.

2.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, também foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil - UNESC, aos 150 dias. Este ensaio seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 7222 (2011). A prensa utilizada para este ensaio foi a mesma utilizada no ensaio de compressão axial, a Emic, modelo PC200. Ao final deste ensaio através da captação dos dados feita pelo software Tesc 3.04, foram obtidos os valores de resistência a tração por compressão diametral na unidade Megapascals (MPa).

2.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os ensaios de módulo de elasticidade, realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil - UNESC, ocorreram aos 150 dias. Este ensaio seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 8522 (2008). A prensa utilizada neste ensaio foi a Emic, modelo SSH200. Através dos medidores de deformações se obteve os resultados de módulo de elasticidade (GPa). E a captação destes dados foi feita pelo software Tesc 3.04.

2.2.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO A TRÊS PONTOS

Os ensaios de flexão nas 6 vigas sem reforço e 6 vigas reforçadas foram feitos utilizando o pórtico de reações (equipamento composto por um pórtico metálico e um cilindro hidráulico). Os deslocamentos verticais foram obtidos por dois transdutores de deslocamentos (LVDT), que foram posicionados no centro da viga, um de cada lado da mesma. O resultado de deslocamento de cada viga foi calculado fazendo-se uma média entre os dois transdutores.

Por se tratar de vigas curtas, foi optado pelo ensaio de flexão a 3 pontos, descartando-se o método á 4 pontos.

2.2.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA, TESTE DE HIPÓTESE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIA COM VARIÂNCIAS DESIGUAIS E TESTE DE TUKEY

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística em que três ou mais amostras distintas são comparados, analisando assim se há uma disparidade significativa entre as médias e se os fatores influenciam alguma variável dependente. Neste artigo, foi utilizado este teste para a análise de variância nos ensaios de Resistência à Compressão Axial, Resistência à Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade, fazendo-se uma comparação entre os três grupos de corpos de prova de temperaturas distintas.

O teste de hipótese de comparação de média com variâncias desiguais foi utilizado para comparar as vigas VSR e VR em cada temperatura, para avaliar se ocorreram diferenças significativas com e sem reforço.

Por fim, o teste de Tukey avaliou em quais temperaturas havia diferenças estatisticamente significativas quanto às temperaturas.

Estes testes têm nível de confiança de 95%. E para se constatar que há diferença significativa entre variáveis o valor P deve ser inferior a 0,05.

Os três testes foram executados no software Microsoft Excel.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

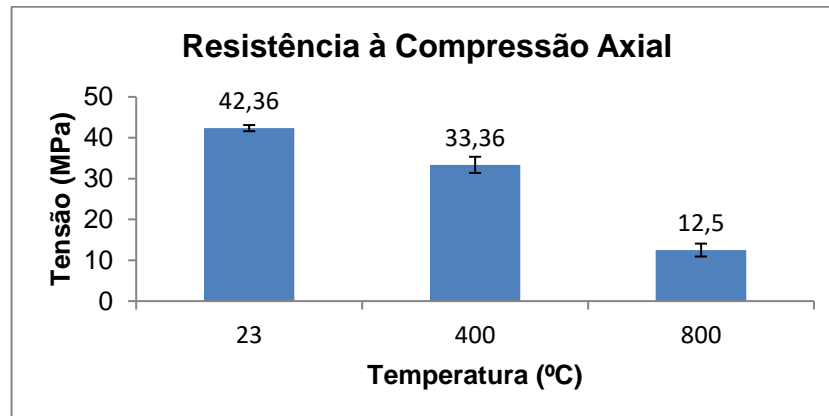
3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL, COMPRESSÃO DIAMETRAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos indicam que aos 150 dias de cura em imersão, o concreto atingiu resistência esperada em todas as amostras, sendo um resultado adequado. Estas amostras foram divididas em 3 grupos de acordo com as temperaturas de 23°C, 400°C e 800°C, sendo 9 corpos de prova para cada temperatura. Para as três temperaturas foram feitos ensaios de Resistência à Compressão Axial, Resistência à Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade, sendo expostos os resultados obtidos.

3.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Na figura 4, estão dispostas as médias dos resultados das três temperaturas. Pode-se identificar que conforme a bibliografia, na medida em que as temperaturas aumentaram a resistência do concreto diminui gradativamente.

Figura 4 - Resistência à compressão axial nos corpos de prova.



Fonte: Da autora, 2017.

Quando comparada à média das amostras a temperatura ambiente (23 °C) com a temperatura de 400 °C observa-se uma disparidade significativa entre as resistências a compressão axial das mesmas. A 400 °C existe um decréscimo de 21,25 % e a 800 °C ocorre uma perda significativa de resistência a compressão axial de 70,49 %, ambas comparadas a temperatura ambiente.

Esta disparidade pode ser explicada pelas propriedades do concreto que sofrem um déficit significativo em sua eficiência quando expostas a altas temperaturas. Segundo Costa e Silva apud SILVA (2009), quando o concreto é exposto a altas temperaturas a pasta de cimento Portland que o compõe se desagrega quimicamente por desidratação, debilitando o concreto curado. A água livre vaporiza-se à medida que a temperatura aumenta.

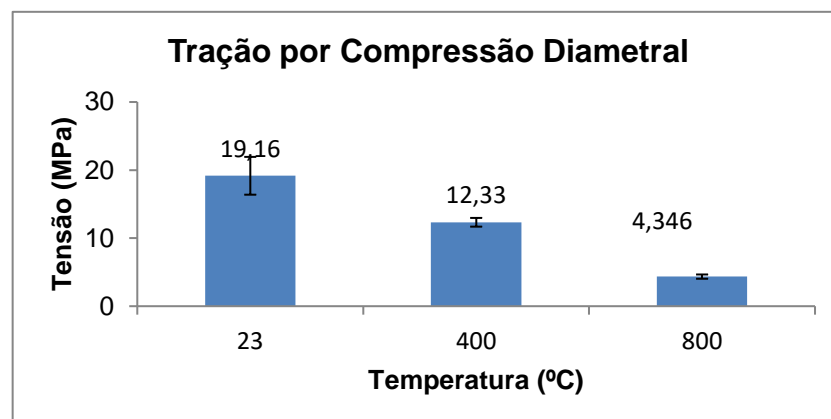
Ainda segundo Silva (2009), por volta de 200 °C a 300 °C dá-se a evaporação completa da água capilar. Entre 100 °C e 400 °C, o gel do C-S-H desidrata o que acarreta em uma redução sucessiva da água de gel. Este efeito origina a diminuição da resistência à compressão axial e surgimento de fissuras superficiais no concreto. Através da análise de variância (ANOVA) foi comprovada a diferença existente entre os dados das três amostras de temperatura, obtendo-se um valor de $P = 9,68 \text{ E-}7 <$

0,05. E como complemento, o teste de Tukey apontou que todas as médias analisadas foram diferentes entre si.

3.1.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As médias dos resultados das três temperaturas no ensaio de resistência à tração por compressão diametral estão situadas na figura 5.

Figura 5 - Médias da Resistência à Tração por Compressão Diametral das três amostras de temperatura.



Fonte: Da autora, 2017.

As médias deste ensaio para cada temperatura demonstram que o concreto sofreu reduções mecânicas conforme o aumento de temperatura, sofrendo uma queda acentuada em sua Resistência à Tração por Compressão Diametral. Comparando as amostras em temperatura ambiente e 400 °C, houve um decréscimo na tração de 35,65 %, fazendo-se a análise da média de 23 °C e 800 °C houve uma diminuição significativa na tensão de tração do concreto de 77,32 %.

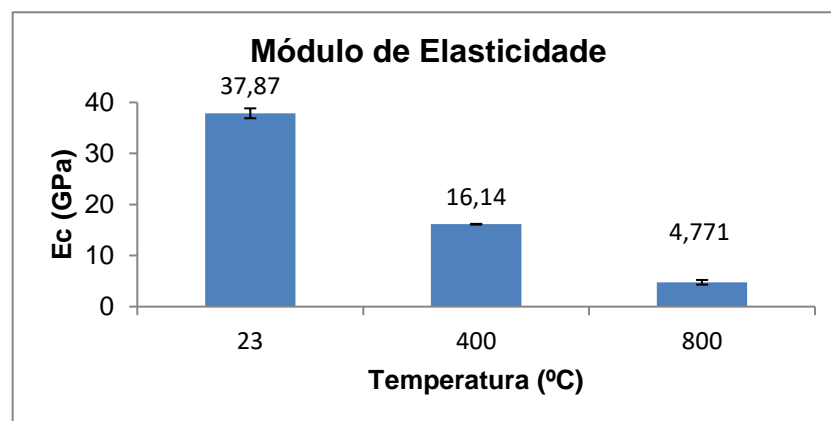
Com a análise estatística de variância (ANOVA) foi possível comprovar a diferença significativa entre as amostras de temperatura, obteve-se valor de $P = 0,00011 < 0,05$. E o teste de Tukey apontou que as médias analisadas foram diferentes entre si. Estes resultados ressaltam, assim como nos ensaios de Resistência à Compressão Axial, que o concreto exposto a temperaturas elevadas sofre degradação de suas propriedades físicas e mecânicas. Porém, como ressaltam Castro et al. (2011), a

resistência a tração do concreto é mais sensível a formação de fissuras do que sua compressão, isto ocorre devido a uma maior diferença entre tensões nas diferentes temperaturas. A justificativa para esta afirmação pode estar relacionada a elevada quantidade de micro e macro-fissuras produzida nas amostras devido às incompatibilidades térmicas existentes no interior do concreto nestas condições de aquecimento.

3.1.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados do ensaio de Módulo de Elasticidade nos 9 corpos de prova estão dispostos na figura 6.

Figura 6 - Média dos Módulos de Elasticidade das três amostras de temperatura.



Fonte: Da autora, 2017.

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que o Módulo de Elasticidade do concreto, tal como a Resistência a Compressão Diametral e Resistência a Compressão Axial, decresce proporcional ao acréscimo de temperatura. A 800 °C o módulo de elasticidade teve uma queda de 70,44 % quando comparada à média dos corpos de prova a 400 °C, e um decréscimo de 87,40 % quando comparado a média na temperatura de 23 °C.

Por meio da análise estatística de variância (ANOVA), foi comprovado que existe diferença significativa entre as médias das diferentes temperaturas, resultando num valor de $P = 6,79 \text{ E-}11 < 0,05$. Através do teste de Tukey, foi possível verificar que há

diferença significativa entre as amostras de temperatura, as três amostras são diferentes entre si.

Segundo Costa e Pignatta apud SILVA (2009), a existência de microfissurações na zona de transição por exposição ao fogo, tem grande influência na rigidez e módulo de elasticidade do concreto. Esta perda no módulo de elasticidade é capaz de gerar deformações não esperadas para os elementos estruturais submetidos a altas temperaturas. Mesmo que a peça não entre em colapso, isto será capaz de torna-la imprópria para uso.

3.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO A TRÊS PONTOS

O ensaio de flexão a três pontos, permitiu uma análise relevante sobre as máximas cargas que as vigas sem reforço (VSR) e reforçadas (VR) obtiveram, de acordo com o máximo deslocamento tolerado por norma e também a máxima carga de ruptura. A figura 7, apresenta o pós-ensaio de flexão a 3 pontos de uma das vigas VSR.

Figura 7 - (A) Viga de referência após ensaio de flexão à três pontos; (B) Detalhe da viga ensaiada, com cisalhamento partindo da face tracionada.

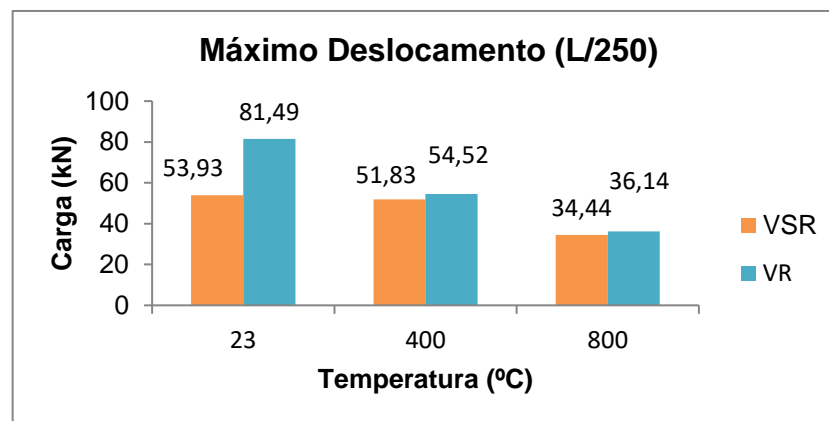


Fonte: Da autora, 2017.

3.2.1 DESLOCAMENTO MÁXIMO (L/250)

Na figura 8, estão dispostas as médias dos resultados atingidos nos ensaios de flexão a 3 pontos, para cada amostra de temperatura, de acordo com o deslocamento máximo permitido por norma L/250 (3,4 mm).

Figura 8 - Média das cargas máximas permitidas por norma (L/250) atingidas nos ensaios.



Fonte: Da autora, 2017.

Constatou-se que no deslocamento máximo permitido pela norma NBR 6118 (2014) de L/250 (3,40mm), as vigas VSR a temperatura ambiente (23°C), suportaram em média a carga de 53,93 kN enquanto que as vigas VR suportaram em média a carga de 81,49 kN, tendo assim um acréscimo de 51,10 % às vigas reforçadas.

Foi realizado o teste de hipótese de comparação de média com variâncias desiguais entre as variáveis destas duas amostras e comprovou-se que estes valores foram expressivamente diferentes.

Já nas vigas aquecidas a temperatura de 400 °C o acréscimo da carga máxima permitida por norma foi mínimo, nas vigas VSR a carga do deslocamento máximo foi de em média 51,83 kN e nas vigas VR a carga foi de em média 54,52 kN, tendo um acréscimo de carga de 5,19 %. Estes dados conferem segurança aos estudos de Lima et al. (2002).

Segundo Lima o aquecimento no compósito de fibra de carbono utilizado no reforço estrutural de uma viga provoca a volatilização do adesivo epóxi que é empregado para prender o tecido ao concreto, podendo influenciar negativamente a integridade estrutural da fibra posterior ao resfriamento. Em seus estudos, Lima constatou que

aos 100 °C o adesivo epóxi começava a se deteriorar, sendo no intervalo de 230 °C e 495 °C a ocorrência de maiores danos ao polímero.

Ainda como comprovação dos resultados obtidos pelas amostras na temperatura de 400 °C foi efetuado o teste de hipótese de comparação de média com variâncias desiguais entre as mesmas, comprovando assim que não existe diferença significativa entre VSR e VR a 400 °C.

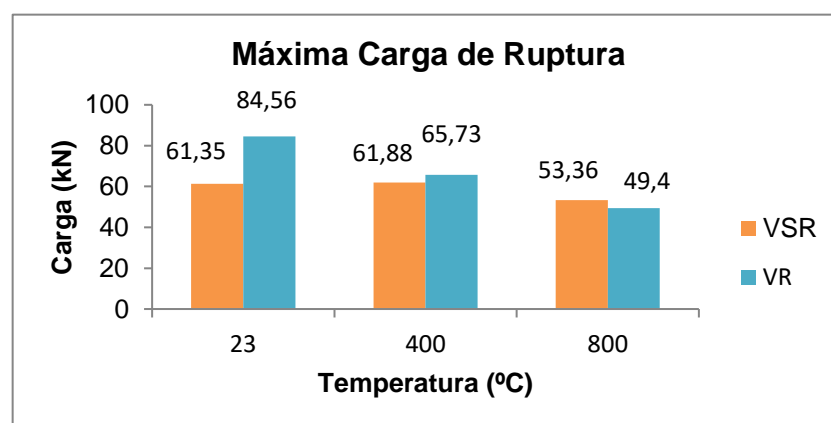
A 800 °C observou-se que seguindo a mesma linha das vigas aquecidas a 400 °C, o reforço não se mostrou significativamente eficiente, visto que as vigas VSR tiveram carga máxima de em média 34,44 kN e as vigas reforçadas resultaram na carga de 36,14 kN, tendo assim um incremento pouco expressivo de 4,93 % de carga. Como comprovação desta afirmação, foi utilizado o teste de hipótese de comparação de média com variâncias, com 95 % de confiança, e constatou-se que não há diferença significativa entre as amostras analisadas.

O teste de análise de variâncias foi realizado, comparando as vigas VR nas três temperaturas e constatou-se que há diferença significativa entre estas três amostras de temperatura e o teste de Tukey comprovou que todas as três amostras são diferentes entre si, uma não é significativamente igual as outras duas.

3.2.2 CARGAS DE RUPTURA

Os resultados obtidos analisando as médias das cargas máximas de ruptura nas vigas estão dispostos na figura 9.

Figura 9 - Máxima carga de ruptura nas vigas sem reforço e reforçadas.



Fonte: Da autora, 2017.

Analisando as temperaturas de forma individual pode-se constatar que em temperatura ambiente (23 °C), o reforço foi eficiente tendo um aumento de 37,83 % de resistência na carga máxima de ruptura quando comparado à média das cargas nas vigas sem reforço. O teste de hipótese de comparação de média com variâncias desiguais comprovou a diferença significativa entre as amostras.

Já a 400 °C, o reforço com fibra de carbono não se mostrou significativamente eficiente tendo um acréscimo de 6,22 % de resistência na carga de ruptura, quando comparado à amostra VSR na mesma temperatura. Este resultado pouco expressivo foi comprovado fazendo-se o teste de hipótese de comparação de média com variâncias desiguais.

O fato de o compósito não ter agregado resistência significativa as vigas, pode ser explicado considerando que aos 400 °C a resina epóxi volatizou (processo de passagem do estado sólido para o gasoso) de forma quase total, sendo assim a fibra de carbono se despreendeu da viga parcialmente, causando a ineficiência da mesma. Segundo Elkady et al. (2010), o compósito de fibras de carbono começa a perder sua resistência significativa aos 400 °C, além disso a resina aplicada para fixar a fibra ocasiona destruição ou pelo menos a degradação da fibra de carbono quando aquecida, fazendo com que o compósito perca as propriedades para as quais foi destinada.

A última temperatura de análise, 800 °C, mostrou que a fibra de carbono perdeu totalmente suas propriedades sendo que a resina epóxi e a fibra de carbono volatizaram completamente. Aos 800 °C o concreto sofreu reduções significativas de suas propriedades físicas e mecânicas. Tendo visualmente sua estrutura abalada, com cor cinza esbranquiçada, que segundo Morales et al. (2011) representa a perda das propriedades mecânicas do concreto, este autor também relata que nestas condições de temperatura ocorrem “lascamentos do cobrimento das armaduras, com exposições de até 25 % da superfície das mesmas”.

Estes resultados obtidos nas temperaturas de 400 °C e 800 °C dão propriedade as afirmações feitas por Oliveira et al. (2009). Segundo ele as matrizes geralmente utilizadas como as epóxias não são apenas combustíveis, bem como liberam grande quantidade de fumaça densa e escura. Devido à ausência de oxigênio entre as áreas de aderência fibra de carbono/ resina as chamas são inibidas pelo compósito, todavia a

resina inicia um processo de “amolecimento”. Ao atingir a temperatura de transição vítrea, a resina cessa a transferência de tensões entre as fibras, prejudicando a ligação. Os efeitos se apresentam através de uma contínua fissuração e um acréscimo de deformações até a ruptura, com possível degradação também das fibras.

Este processo sofrido pela resina e conseqüentemente pela fibra pode ser considerado uma das causas das vigas VSR terem apresentado um resultado melhor do que as vigas VR, pois a resina pode ter prejudicado estruturalmente a superfície da viga em que estava fixada a fibra, superfície esta de tração, foco deste estudo.

O teste de análise de variâncias, feito comparando as vigas VR no aumento de temperatura e as vigas VSR no aumento de temperatura, comprovou que os valores das amostras são significativamente diferentes entre si. E através do teste de Tukey verificou-se que existe diferença significativa entre si nos grupos de amostras reforçadas e sem reforço.

3.3 COMPARAÇÕES COM OS RESULTADOS OBTIDOS POR KNY (2017)

Tendo como base os resultados obtidos por Kny em seu artigo, e sendo utilizado no presente estudo o mesmo traço e armaduras, foi possível fazer uma comparação entre os resultados alcançados nestes dois trabalhos.

Segundo Kny, a resistência a compressão axial sofreu perdas significativas quando exposta a altas temperaturas, esta afirmação foi confirmada neste trabalho, sendo que ocorreu uma redução considerável progressivamente ao aumento de temperatura. Ainda sobre os estudos de Kny, faz-se uma relação entre as vigas reforçadas por ele e as apresentadas neste estudo. Tendo em vista que nos estudos do autor, as vigas já haviam sido expostas a altas temperaturas, reforçadas e ensaiadas obtendo assim resultados positivos até a temperatura de 400 °C. Já neste artigo, não se obteve resultados significativos visto que as vigas foram reforçadas e posteriormente ensaiadas sofrendo danos devido as altas temperaturas em que foram expostos os reforços com fibra de carbono.

A 800 °C, Kny também não obteve resultados significativos junto ao reforço, visto que as vigas nesta temperatura tiveram sua face tracionada totalmente danificada,

dificultando a fixação da fibra na viga. Desta forma, o reforço não somou a viga para um aumento significativo de resistência.

4 CONCLUSÕES

- Para os ensaios de compressão axial, compressão diametral e módulo de elasticidade obteve-se resultados significativos quanto à diminuição de resistência devido ao aumento de temperatura no concreto. Para os mesmos, o teste de ANOVA e teste de Tukey comprovou esta disparidade entre amostras de temperatura.
- Os ensaios de flexão a 3 pontos nas vigas em temperatura ambiente comprovaram a eficiência do reforço nestas condições, as vigas VSR suportaram em média a carga de 53,93 KN enquanto que as vigas VR suportaram em média a carga de 81,49 KN, tendo assim um acréscimo de 51,10 % as vigas reforçadas.
- Ainda pode-se constatar através do ensaio de flexão a 3 pontos, que houve uma redução de desempenho do reforço com a exposição ao calor e esta foi gradativa ao aumento de temperatura de 400°C para 800°C.
- O principal agente gerador do decréscimo no desempenho dos reforços foi a volatilização do adesivo epóxi. Nas temperaturas de 400 °C e 800 °C a resina volatilizou de forma praticamente total fazendo com que a fibra de carbono perdesse suas propriedades como reforço. Esta conclusão foi confirmada pelo teste de hipótese de comparação de média com variâncias desiguais.
- O reforço com fibra de carbono ficou comprometido nas temperaturas de 400 °C e 800 °C, visto que o adesivo empregado na fixação do reforço na viga possuía abundante quantia de carbono e hidrogênio, que são produtos inflamáveis.
- Devem ser estudadas proteções passivas ao fogo para conferir segurança às estruturas reforçadas, impedindo-se o colapso das mesmas.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomendações para trabalhos futuros:

- Expor a altas temperaturas vigas de concreto reforçadas com fibra de carbono, cujas fibras estejam envoltas por proteções passivas como por exemplo madeira ou gesso.
- Avaliar diferentes formulações de resina expostas a altas temperaturas.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**: NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**: NBR 14432. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. NBR 7222. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Execução de estruturas de concreto – Procedimento**: NBR 14931. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**: NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **440 – Fiber - Reinforced Polymer Reinforcement**. Anaheim, CA, 2016.

SILVA, Daiane dos Santos da. **Propriedades Mecânicas Residuais Após Incêndio de Concretos Usados na Construção Civil na Grande Florianópolis**. 2009. 7p. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Univ. Fed. de Santa Catarina, Florianópolis.

COSTA, Carla N., DE FIGUEIREDO, Antonio D., SILVA, Valdir P. **Aspectos Tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas**. In: Nutau 2002, SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE, ARQUITETURA, DESENHO URBANO, 2002, São Paulo, 2002, p. 2.

PEREIRA, Raí, S. **Recuperação estrutural de vigas de concreto armado colapsadas utilizando reforço de fibra de carbono**. Trabalho de conclusão de Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. 2016.

ALBUQUERQUE, Gabriela Bandeira. D. M. L. D., **Dimensionamento de vigas de Concreto Armado em Situação de Incêndio**. Curso de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

MACHADO, Ari De Paula., **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: Better, 2010.

BONFANTE, Leonardo, K. **Análise da Eficiência do Reforço com Fibra de Carbono na Área Tracionada de Vigas de Concreto Armado Submetidas á Altas**. Trabalho de conclusão de Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. 2017.

SCHNEIDER, Fernanda H., SCHULTZ, Jacqueline da L., WIERZBICKI, Luísa R., MAZER Wellington. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**. Edição Especial, Paraná, 2017.

DE ALMEIDA, Jacinto M. A., AINON, Maurice, SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto Da. **Avaliação Experimental de Concretos Submetidos á Ação das Altas Temperaturas Através de Ensaios Destrutivos e Ensaios Não Destrutivos**. Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2013. Rio Grande do Sul, 2013.

BATISTA, Juliana T. M., SILVA, Vitório A., REZENDE, Emanuela C. L., MONTEIRO, Eliana C. B. **Reforço com compósito de fibras de carbono: Alternativa moderna no cotidiano das obras**. COMPAR- Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. Recife, 2017.

LIMA, Rogério C. A., SILVA FILHO, Luiz C. P. D., CAMPAGNOLO, João L. **Revestimento com proteção passiva de elementos estruturais reforçados e submetidos a elevadas temperaturas**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Paraná, 2002.

CASTRO, A. L., TIBA P. R. T., PANDOLFELLI V. C. **Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas. Revisão**. Cerâmica 57 – Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, Clayton R., MORENO, Armando L. J. **Efeito do fogo nas estruturas de concreto reforçadas com FRP**. Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto BCC2009 - IBRACON. São Paulo, 2009.

MORALES, Gilson, CAMPOS, Alessandro, FAGALLO, Adriana, M. P. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina. Paraná, 2011.

ELKADY, H., HASAN, A. **Protection of reinforced concrete beams retrofitted by carbono fibre-reinforced polymer composites against elevated temperatures**. NRC Research Press. Egypt, 2010.